

## 2.4 Materiais e Métodos de Ensaio com Altíssima Velocidade de Corte

Não existe ainda uma norma para ensaios envolvendo HSM, como há na maioria de outros processos de fabricação: tanto devido a sua utilização recente como ao fato de ser um processo de complexidade elevada, muitas das análises realizadas contemplam poucas variáveis em casos específicos, obtendo informações de extrema valia, porém de pouca utilidade ao se variar minimamente as condições em que foram obtidas.

Destas análises específicas, pode-se identificar 8 grandes conjuntos em que estas pesquisas encontrem compatibilidade: desgaste de ferramenta de corte, acabamento superficial, qualidade dimensional de peça acabada, análise da vibração durante a usinagem, esforços de corte, morfologia de cavaco, custos econômicos e temperatura durante a usinagem.

As medições fundamentadas em medir algum tipo de desgaste de ferramenta de corte são, de longe, a maior base de dados existente na literatura disponível. Diversos critérios de monitoramento indireto são adotados para mensurar o volume de material removido da ferramenta de corte após a usinagem.

Os trabalhos podem utilizar critérios de comprimento da área desgastada da aresta da pastilha, como o VB, para comparar diversas classes de ferramentas de usinagem assim como demonstrar o comportamento da evolução do desgaste durante o corte. Não são raros também casos de medição de desgaste por intermédio de um valor de vida de ferramenta, geralmente através de comparações de comprimento de corte efetuado ou tempo de usinagem decorrido até um critério de falha preestabelecido, como quebra ou aresta postiça (Silva & Novaski, 2001; Braghini Jr. et al., 2001; Coelho et al., 2001; Fallböhmer et al., 2000; Kitagawa et al., 1996; Dewes & Aspinwall, 1996; Schulz & Moriwaki, 1992).

Para os trabalhos que adotam o acabamento da superfície usinada como parâmetro de análise, toda a literatura aponta para a utilização de valores

normalizados comuns as operações de usinagem corriqueiras, tais como  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ , etc.

Algumas pesquisas enfocam o mínimo valor de algum índice de rugosidade que pode ser alcançado, em determinadas condições de corte com HSM. Evidentemente buscando comprovações de operações de acabamento que possam ser substituídas pelo processo com HSM que analisam, buscam assim indicar todos os parâmetros de corte e características da ferramenta que atingem valores de índices de rugosidade menores ou iguais aos de processos de fabricação caros e inflexíveis, tais como retificação e polimento (Fallböhmer et al., 2000; Dewes & Aspinwall, 1996).

Outras vertentes, ainda com base em critérios de acabamento superficial que atingem com processo de usinagem com HSM, partem para uma demonstração de como alguns valores de rugosidade variam em relação a algum outro parâmetro do corte em que analisam. Casos relevantes que podem ser encaixados nesta definição são os trabalhos de Braghini Jr. et al. (2001), em que consideram a variação do índice  $R_a$  em relação ao volume de cavaco removido, além de Coelho et al. (2001), sobre a variação deste mesmo índice em relação ao comprimento de corte efetuado, bem como Jaissle (1996) que analisa a variação de diversos índices de rugosidade com relação ao avanço empregado. Vale a pena citar o emprego da análise da rugosidade versus a relação de frequência, em uma operação de frestorneamento, realizado por Correa et al. (2001): evidências claras de processos incomuns que aliados a processos com HSM permitem vantagens claras, como por exemplo a substituição da retificação de virabrequins, cara e inflexível.

Partindo para o grupo das pesquisas voltadas a análise da qualidade dimensional da peça acabada obtida por usinagem com altíssima velocidade de corte, Dewes & Aspinwall (1997), cita obras que reportam as condições de usinagem de topo com HSM que chegam a variar dezenas de micra devido a deflexão da ferramenta utilizada, sendo que esta deflexão aumenta consideravelmente com o progresso de seu desgaste.

Além deste caso, o estudo feito por Heisel & Feinauer (1999) comprovou que desvios na forma durante o fresamento circular interno com HSM devido a vibração não são constantes, uma vez que o diâmetro resultante da interpolação do corte varia conforme a direção no avanço. Já em cortes com movimentação de avanço constante, o desvio máximo de geometria que pode ser atingido é equivalente a amplitude da vibração da ponta da ferramenta perpendicular a superfície usinada. Pode, portanto, ser compensado através de uma correção na programação do comando numérico da máquina.

Também sobre a análise da qualidade dimensional de peça acabada, talvez a principal aplicação da variação dimensional para instalações de alta produção com HSM seja o estudo voltado a qualidade geral de furações em peças de ferro fundido: extensos testes têm sido desenvolvidos de forma a determinar quanta influência o avanço durante a usinagem com altíssima velocidade de corte tem sobre as principais tolerâncias de furos. Características como desvio de posição de centro, conicidade, circularidade, desvio de diâmetro e inclinação apresentam-se muito melhores que as obtidas por processo convencionais, entretanto não aparentam ter uma tendência de variação com relação ao avanço (Jaissle, 1996).

O grupo de análises da vibração durante o processo de usinagem com altíssima velocidade de corte encontra dificuldades no processamento e leitura dos fenômenos que considera relevantes para a modelagem e controle de trepidação (conhecido também como "chatter control", do inglês): não apenas devido à rapidez que os fenômenos analisados ocorrem, mas também por causa da elevada rigidez exigida nas máquinas de HSM, que atrapalha ainda mais o monitoramento deste tipo de leitura.

De uma maneira geral, o processo de amortecimento durante o processo de usinagem pode ser explicado conforme a figura a seguir:

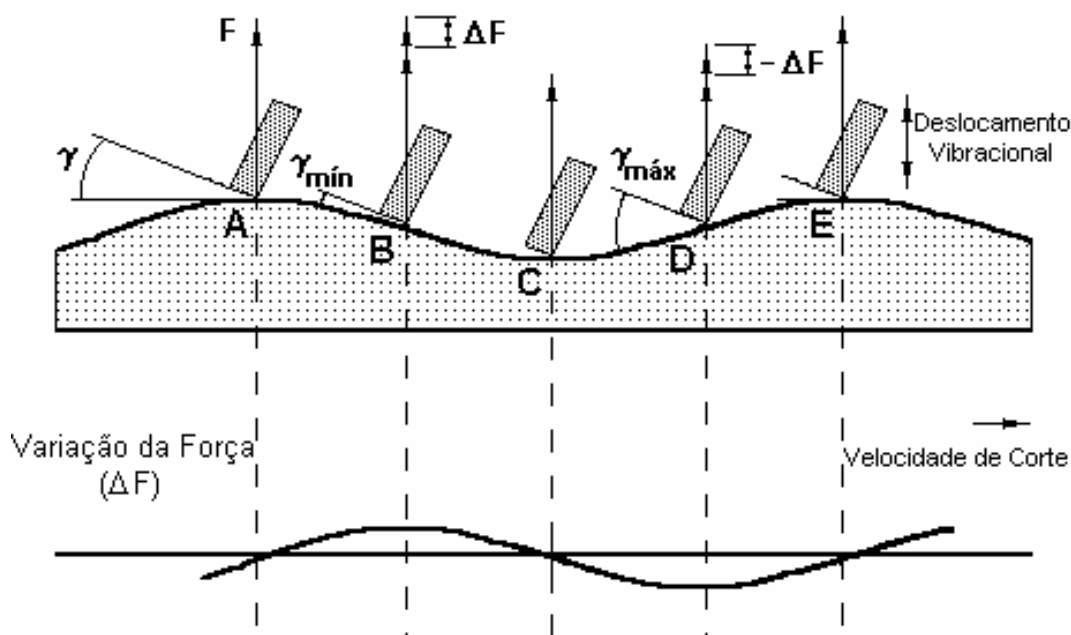


Figura 8: Mecanismo do processo de amortecimento. Trata-se um fresamento de topo, conforme proposto por Tlustý (1993).

Considera-se a movimentação da ferramenta da esquerda para a direita, com velocidade de corte constante, e vibrando para baixo e para cima. Seguindo o caminho de A para C, o ângulo de folga  $\gamma$  se reduz; seguindo para cima, de C para E  $\gamma$  aumenta. Uma componente  $\Delta F$  da força de corte depende de  $\gamma$  e aumenta conforme  $\gamma$  diminui. Desta maneira,  $\Delta F$  varia em fase com a velocidade da vibração, porém com uma defasagem de  $90^\circ$  do deslocamento vibracional, constituindo assim uma força de amortecimento. Aumentando-se a velocidade de corte a variação de  $\gamma$  e  $\Delta F$  diminui, diminuindo o processo de amortecimento.

Assim, assumindo-se que o processo de usinagem em questão corresponda a um sistema vibratório de um grau de liberdade, pode-se construir diagramas de lóbulos, em que estipulam-se parâmetros críticos (por exemplo, a profundidade de corte) em relação a velocidade do fuso. Conforme pode ser observado no exemplo seguinte, para velocidades baixas, a profundidade de corte crítica é muito alta, pois o processo de amortecimento do processo de usinagem ainda é relevante. Ao se aumentar a velocidade do fuso, o processo de amortecimento reduz-se até o ponto em que não

gera efeito algum, para então acumular-se em regiões, ou lóbulos, compostos dos harmônicos da vibração analisada.

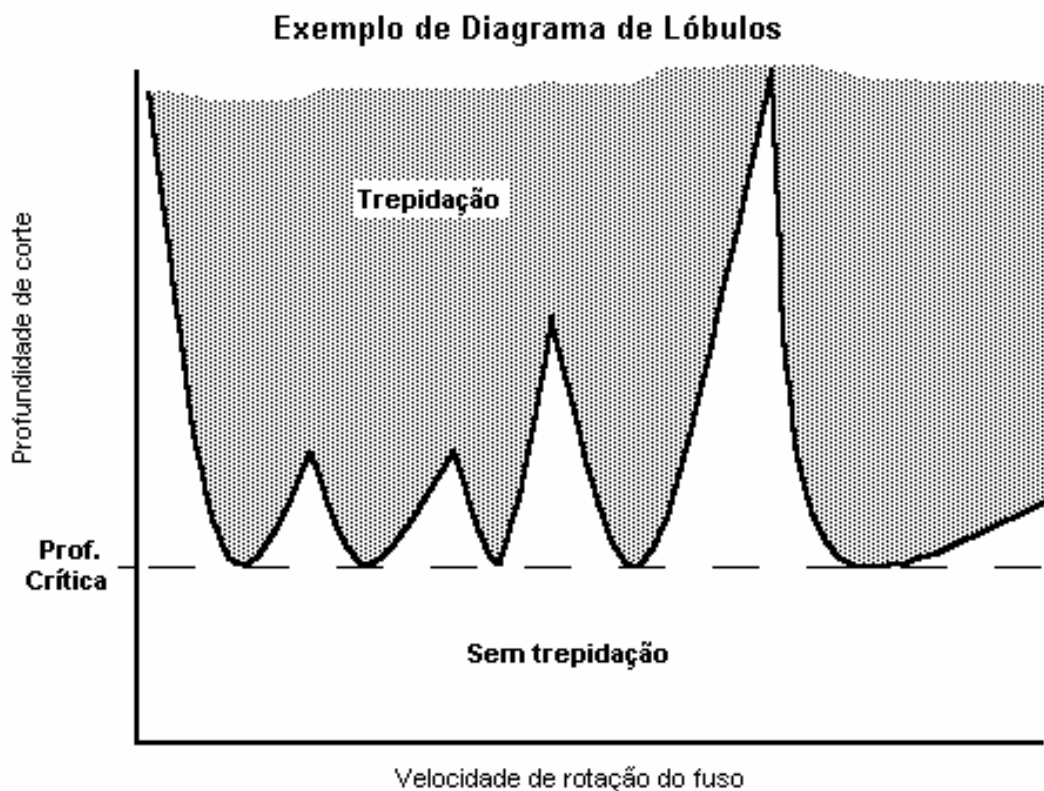


Figura 9: Diagrama de estabilidade para usinagem com altíssima velocidade de corte. Os lóbulos identificam as regiões em que se pode operar sem a ocorrência de trepidações.

Pode-se obter de forma analítica tais lóbulos. Porém a dificuldade em se analisar a dinâmica do conjunto composto pelo fuso, suporte e ferramenta torna esta alternativa pouco prática. Tlustý (1993), aplica um sistema desenvolvido para tal, em que um microfone é utilizado para detectar a trepidação e sua frequência dentro do sinal sonoro e então automaticamente regular a velocidade para uma zona de estabilidade.

Seguindo com o conceito de análise vibracional da usinagem com altíssima velocidade de corte, Heinsel & Feinauer (1999) em seu trabalho sobre influência dinâmica no fresamento com altíssima velocidade de corte, aplica séries de Fourier para decompor e analisar o sinal da força de desbalanceamento. Ao se criar uma simulação numérica a partir do modelo proposto, assume-se que até o quinto

harmônico da série numérica obtida exista a necessidade de investigação, sendo que conforme o caso, o nível de detalhamento possa ser estendido somente até o terceiro harmônico.

Estes autores ainda sugerem que, ao se verificarem os resultados obtidos da simulação em usinagens, não houve influência originada por desbalanceamentos no acabamento superficial, somente influência na qualidade dimensional.

Em relação ao monitoramento direto de esforços de corte, tais como forças de corte e de avanço, há uma dificuldade inerente ao processo de HSM. Tanto dificuldades imediatas, como a ausência de placas dinamométricas comercialmente disponíveis para este tipo de usinagem, bem como a dificuldade em se instrumentar deslocamentos e acelerações em tempos muito curtos, força a necessidade de processamentos e leituras mais caros e sofisticados.

Schey (1970), em sua obra clássica, afirma sobre os métodos de teste para usinagem que "as dificuldades são maiores do que em um processo de deformação [plástica], porque as condições de estado estável dificilmente existem por um tempo longo o bastante para permitir uma rápida exploração de variáveis". Este autor ressalta ainda que "único neste caso [testes de usinagem] são as taxas de mudanças e a extrema sensibilidade do sistema em relação as variáveis."

Ainda assim, muitos autores contribuem para o entendimento da dinâmica da usinagem com processos de monitoramento relativamente simples. Hamann et al. (1994) analisaram as forças envolvidas no corte através de um dinamômetro piezelétrico de três componentes. Ao colher dados referentes a usinagens com altíssimas velocidades de corte para aços inoxidáveis austeníticos com alto conteúdo de enxofre, verificou-se que a tensão de cisalhamento tende a cair conforme se aumenta a velocidade de corte. A força de corte específica para o tipo analisado também apresentou o mesmo comportamento, entretanto somente até o aumento do atrito na face da ferramenta: a partir daí a força de corte específica tende a aumentar.

De qualquer forma, mesmo com métodos de leitura e aquisição de dados comuns, cuidados extras devem ser levados em conta, principalmente no momento da atribuição de modelos, de desgaste e de dinâmica, para a usinagem com altíssima velocidade de corte.

Ainda sobre este trabalho de dinâmicas de esforços na usinagem, o próprio autor afirma prevalecer sob determinados momentos, uma condição quasi-hidrodinâmica e/ou hidrodinâmica para a espessura do filme lubrificante. Porém, para o modelo matemático adotado, e conseqüentemente as conclusões que atinge sobre o comportamento da força de corte específica, algumas contradições podem ser apontadas. Todavia, é claro que o encaminhamento do ensaio tem vantagens e contribuições evidentes, não somente para análises de esforços e desgaste, mas também para a compreensão do processo de formação do cavaco em si.

Outro estudo, conduzido por Schulz et al. (1992), resume a mecânica do corte com altíssima velocidade de corte indicando que a força de corte, de maneira geral, diminui com o aumento da velocidade de corte. Isso de acordo com as investigações de McGee (1979), que apontam para um amolecimento do material da peça por aumento da temperatura. Contudo, considera alguns casos em que a força de corte atinja um valor mínimo, para então aumentar com o aumento da velocidade de corte. Estes últimos casos poderiam ser atribuídos a outros fatores, como o aumento do atrito na face da ferramenta, sugerido por Hamman et al. (1994).

De qualquer modo, toda a literatura pesquisada para a medição de esforços de corte é voltada para a obtenção de dados através de métodos convencionais, ainda que cautelas específicas sejam adotadas. Ou seja, não há ainda sensores ou métodos específicos neste sentido, ao menos de uma maneira amplamente divulgada.

Paralelamente a medição de esforços, a análise da morfologia do cavaco em HSM tem consideráveis descobertas sobre o processo de usinagem, mas com métodos mais caros e elaborados.

Kitagawa et al. (1997), através de observações com um microscópio de varredura eletrônica, pode descrever a variação da morfologia do cavaco durante a usinagem de ligas para a indústria aeroespacial, como o inconel e ligas de titânio: verificou-se a redução da espessura do cavaco com o aumento da velocidade de corte, além de uma acentuação no dentado da borda do cavaco.

Junto desta observação, conseguiu-se correlacionar a variação da altura da rebarba durante a usinagem com a velocidade de corte com a rugosidade superficial máxima: ambas decaem com o aumento da velocidade de corte, senão por um pico, correspondente a um grande escoamento lateral do cavaco, que possivelmente é relacionado a uma mudança no comportamento do desgaste da ferramenta.

Investigações através de métodos menos sofisticados, como observação direta, também contribuem sobremaneira. Análises sobre a largura do cavaco em furações com altíssima velocidade de corte ajudam na previsão de afiações especiais para brocas, que contribuem para redução da temperatura na peça, sob as mesmas condições de corte (Cselle, 1999).

Poulachon & Moisan (1998) também utilizam, em seu estudo sobre mecanismos de corte, o microscópio de varredura eletrônica e a micrografia para observar a formação do cavaco e sua morfologia, em aços endurecidos. Mais ainda, através de observações sobre o ângulo de fissura e o ângulo de corte, propõe um modelo matemático para a formação do cavaco que é de extrema relevância.

Este estudo ainda apresenta a evolução da morfologia do cavaco em relação a variação da velocidade de corte. Considera obtenções de cavaco por cisalhamentos catastróficos e por fissuração, além de estabelecer regiões em que o corte proporcionaria encruamento ou o amolecimento térmico do cavaco.

Com relação aos custos econômicos envolvidos na HSM, envolvendo tempo, mão de obra, material e energia consumida, há diversas e extensas bases de dados



sobre este tema, uma vez que os métodos para coleta e análise destas informações são os mesmos utilizados para estudos econômicos de usinagens convencionais.

Logo, Schulz et al. (1992) apontam que, ao se considerar diversos custos por volume no fresamento de diferentes aços, a aplicação da HSM comparada a usinagem convencional é profundamente influenciada pela escolha da tecnologia de corte correta, velocidades de corte, avanços e ferramentas otimizadas. Significando desta maneira que para cada material a ser usinado há um conjunto de operações específicas e relativamente pequeno, que depende de parâmetros tais como máquina, geometria da ferramenta e material.

Mesmo que estes conjuntos sejam pequenos, há relatos de redução de tempos específicos para ferramenta e material acima de 50 % em comparação com máquinas de usinagem convencional. Caso se considere apenas processos de acabamento, a redução apontada aumenta para 80 a 90%.

Ainda referente aos métodos de análise de custos, segundo Dewes & Aspinwall (1997), quatro grandes tipos podem ser destacados nesta revisão, para fresamento com altíssima velocidade de corte:

1. comparação entre o uso de diferentes materiais para ferramentas e o efeito da velocidade de corte;
2. o efeito do avanço por dente em custos globais;
3. o efeito de diferentes estratégias de fresamento;
4. custos globais ao se fabricar um componente em particular.

Constatações curiosas podem vir a tona ao se examinarem os custos envolvidos em um processo com HSM: materiais de dureza mais elevada podem ser mais baratos de se usinar quando comparados com outros de dureza mais baixa, ferramentas de custo dez vezes maior que uma convencional podem acarretar economias consideráveis ao se considerar custos globais.

Por fim, talvez o campo mais promissor para compreensão e análise do processo de usinagem com altíssima velocidade de corte seja o da medição da temperatura durante o corte: seja da peça, da ferramenta ou do cavaco, grandes esforços têm sido direcionados para a medição e para o desenvolvimento de métodos de medição da temperatura em diversos processos de usinagem com HSM. As justificativas para tal são várias: o processo de formação do cavaco é diretamente relacionado à temperatura na região do corte, muitos dos mecanismos de desgaste da ferramenta envolvem ou são atribuídos a temperatura, a seleção do tipo do material da ferramenta e sua geometria são influenciados pela temperatura que se espera obter durante o corte, a utilização ou não de fluidos refrigerantes para o corte são fortemente baseadas em níveis de temperatura que se atinge durante a HSM, entre outros.

Todavia, os métodos utilizados para tal não são corriqueiros, mesmo quando comparados aos métodos adotados para usinagens convencionais, já considerados complexos. Procedimentos convencionais de medição de temperatura para usinagem não apresentam uma resposta satisfatória ao se lidar com HSM, devido a magnitude das deformações ocorridas e as grandes variações de temperaturas no cavaco e na interface peça-ferramenta. Por exemplo, a medição da corrente elétrica para tal, conforme utilizado por McGee (1979), em seu trabalho clássico de medição da temperatura na usinagem com altíssima velocidade de corte, requer tratamentos especiais.

Analisando o caso do método adotado por Kitagawa et al. (1997), utilizou-se um micro-termopar inserido na ferramenta de corte. A inserção foi confeccionada através da inclusão de um fio de tungstênio de  $20\mu\text{m}$  de diâmetro durante o processo de pré-sinterização, para depois ser sinterizado junto da matriz de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  da ferramenta utilizada. A extremidade do fio foi exposta na face da ferramenta através de uma retificação.

Neste mesmo estudo, há ainda o relato de outro método para medição de temperaturas localizadas, em torneamentos intermitentes de peças de titânio: um fio

de tungstênio, revestido de alumina para isolação, foi inserido entre insertos divididos de cerâmica com um sulco em forma de “U” com  $25\mu\text{m}$  de largura. Este esquema para medição pode ser melhor compreendido ao se observar a figura 10:

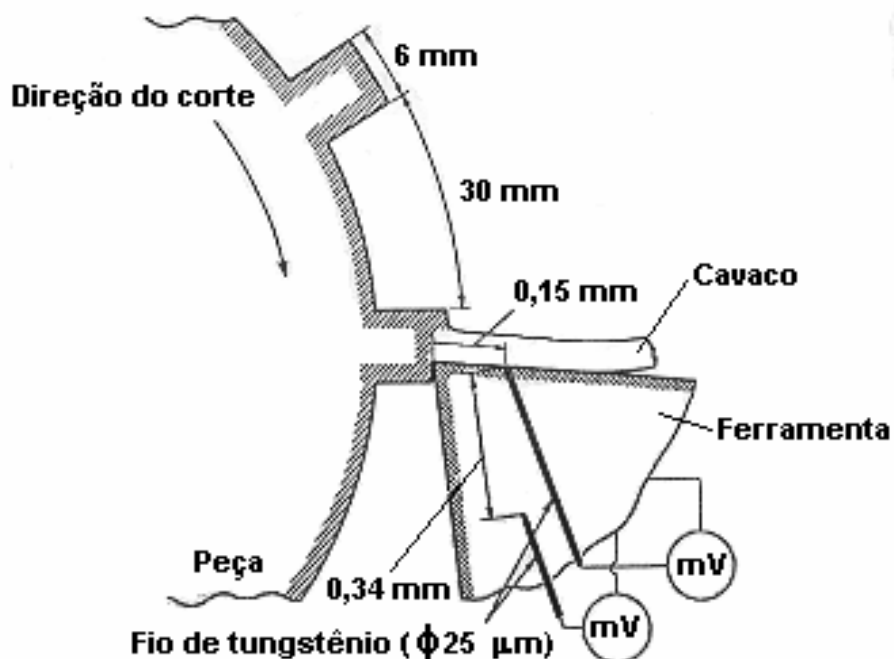


Figura 10: Diagrama esquemático de medição de temperaturas locais (Kitagawa et al., 1997).

Arranjos de termopares dispostos desta maneira permitem medições de temperaturas localizadas e garantem uma precisão elevada das leituras que obtêm durante a HSM. Evidentemente, antes de seu uso estes termopares embutidos nas ferramentas de corte necessitam de ter suas calibrações de temperatura efetuadas, por exemplo em fornos com atmosferas de gases inertes.

Além de permitir compreender a evolução da temperatura durante a usinagem, muitos destes métodos de medição de temperatura contribuem na elaboração de modelos numéricos para transferência de calor. Aliados a modelos matemáticos de condução de temperatura, pode-se criar malhas de elementos finitos que permitam prever mudanças na temperatura durante o corte, além de verificar propriedades atribuídas a temperatura na usinagem, tais como padrões de atrito e desgaste.

Muitas vezes este tipo de instrumentação com termopares inseridos em ferramentas de corte não é acessível, como por exemplo em ferramentas rotativas. A alternativa encontrada por muitos autores é de instrumentar o ensaio com termopares inseridos também, porém na peça a ser ensaiada.

Cselle (1999), para medir a temperatura durante suas furações com altíssima velocidade de corte, inseriu vários termopares na peça a ser ensaiada a uma distância de 0,1mm do furo que surgiria após a usinagem. Conseguiu desta maneira obter leituras consideráveis sobre a variação da temperatura com diferentes ferramentas usinando aço sob altíssimas velocidades.

Indo mais além, outros autores utilizam métodos mistos para medir a temperatura durante a usinagem. Dewes et al. (1999) também implantaram fios termopares de constantan (liga composta de 55% cobre e 45% níquel) revestidos de Teflon na peça de aço para moldes a ser ensaiada. Para tentar garantir que a leitura da temperatura máxima na interface ferramenta/cavaco fosse registrada, o fio termopar foi usinado junto da peça ensaiada, reduzindo as variações induzidas pela posição ao longo da superfície cortante.

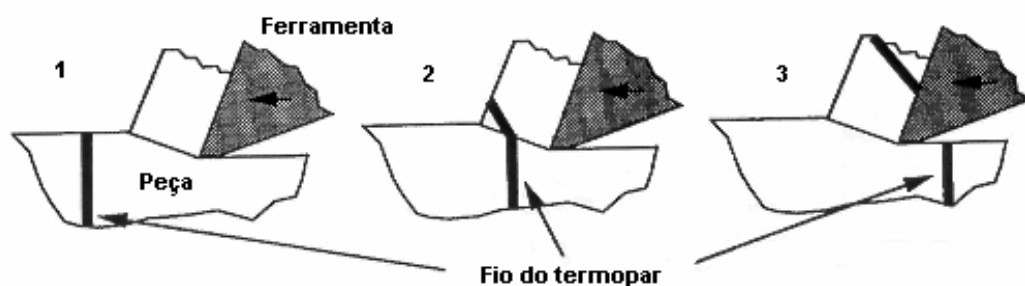


Figura 11: Seqüência de usinagem quando se utiliza o termopar implantado na peça (Dewes et al., 1999).

Além destas medições com termopares, este artigo se vale de medições obtidas através de leituras da radiação térmica emitida durante o processo de usinagem através de um termômetro infravermelho. Este método tem a vantagem de ser menos invasivo que o da técnica com termopares, porém não permite que fluidos

refrigerantes sejam usados no ensaio, bem como muitas vezes a temperatura registrada é aquela da face superior do cavaco, que obscurece a interface peça/ferramenta, normalmente mais interessante.